

PAZ
Navarro

Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos.

gGRAVITY Engineering

MARÍA
N. Sánchez

C.C.Q.Q.

gGRAVITY Engineering)

ELENA
Martín

Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos.

DRAGADOS

IGNACIO
Segura

Dr. C.C.Q.Q.

UPC

JANILL
De la Cruz

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

UPC

ALBERT
De la Fuente

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

UPC

Dovelas innovadoras de alta durabilidad

reforzadas solo
con fibras no metálicas

RESUMEN

Los anillos de dovelas prefabricadas de HRF son un revestimiento habitual en túneles excavados con tuneladora. DRAGADOS-gGRAVITY Engineering-UPC han querido ir un paso más allá estudiando el comportamiento de dovelas reforzadas únicamente con fibras no metálicas. Las exigencias mínimas de durabilidad de los proyectos actuales alcanzan una vida útil de hasta 150 años que es difícil de asegurar con refuerzos metálicos. Se ha analizado el comportamiento estructural, de durabilidad, sostenibilidad y frente al fuego llegando a resultados muy positivos que abren la puerta a esta solución innovadora para estos elementos estructurales y otras muchas aplicaciones.

PALABRAS CLAVE

Dovela, fibra, túnel, durabilidad, innovación

ABSTRACT

The SFRC precast segmental rings are a usual lining for TBM tunnels. DRAGADOS- gGRAVITY Engineering-UPC has wanted to go one step forward to study the non- steel fiber reinforced concrete segments behavior. The minimum durability requirements for current projects has achieved a life-cycle up to 150 years which is hard to assure with any kind of steel reinforcement. Structural, durability, sustainability and fire behavior have been analyzed obtaining very positive results which open the door to this innovative solution for these structural elements and other further applications.

KEYWORDS

Segment, fiber, tunnel, durability, innovation

1

Introducción

Tradicionalmente, las dovelas prefabricadas de hormigón para túneles se reforzaban con armadura por las sollicitaciones a flexotracción durante las primeras horas de fabricación y a tracción cuando son empujadas por los gatos de las tuneladoras. Por ello, las dovelas se sobredimensionaban para cumplir con las resistencias exigidas para los estados iniciales.

Hace aproximadamente 15 años comenzó la aplicación de los hormigones reforzados solo con fibras (HRF) para dovelas. DRAGADOS-gGRAVITY Engineering han colaborado en el diseño e instalación de dovelas prefabricadas de HRF desde entonces, empezando con el proyecto de Crossrail C-305 (Londres, UK) y continuando con North West Rail Link (Sydney, AU), Combined Sewage Storage Tunnel (Ottawa) y Parallel Thimble Shoal Tunnel (Virginia, USA).

Con la intención de aportar una mayor durabilidad y sostenibilidad se ha querido dar un paso más en esta tecnología de materiales y reforzar las dovelas únicamente con fibras no metálicas. Se ha estudiado si se cumplen las exigencias estructurales, de durabilidad y a temperaturas extremas dentro del proyecto de I+D DURADOV, cofinanciado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y Fondos FEDER, desarrollado por DRAGADOS, gGRAVITY Engineering y la Universidad Politécnica de Cataluña durante los pasados 4 años.

Los resultados de este proyecto sirven para demostrar que el hormigón reforzado solo con fibras no metálicas puede cumplir con la función estructural exigida en proyectos de túneles, entre otras conclusiones que se describen a continuación.

2

Nuevos tipos de fibras y mezcla de hormigón

Selección del tipo de fibras

Lo primero que se realizó para llevar a cabo el proyecto fue una selección de las fibras a utilizar para los ensayos, partiendo de las fibras estructurales, macrofibras, más avanzadas disponibles en el mercado. El objetivo ha sido probar fibras de distintos materiales y características geométricas para evaluar su comportamiento estructural, de durabilidad y frente a temperaturas extremas. Así, se eligieron ocho macrofibras sintéticas de poliolefina (PP), dos de vidrio (FV), dos de basalto (B) y una de carbono (C).

Formulación del hormigón

El HRF para dovelas debe cumplir una serie de características para que su puesta en obra sea adecuada y para que las fibras se acoplen bien a la mezcla. Generalmente, se piden resistencias a compresión medio-elevadas, 40-60 MPa, lo que exige ir a contenidos de cemento superiores a los 350 kg/m³. Además, suelen tener exigencias también de durabilidad, lo que implica utilizar contenidos altos de cemento y de agua bajos para crear unas estructuras poco porosas que sean difíciles de atacar. En cuanto a los áridos, es necesario diseñar una mezcla en la que se consigan curvas de áridos continuas y compactas para facilitar el obtener altas resistencias en el hormigón. Se debe tener en cuenta el tipo, forma y dimensiones de la fibra que se vaya a mezclar con el hormigón, ya que cada una de ellas está constituida por diferentes compuestos que pueden favorecer o dificultar el mezclado. Deben quedar perfectamente inmersas en la matriz del hormigón para que su adherencia sea máxima.

En este proyecto se ha trabajado con dos dosificaciones, una de hormigón convencional y otra de alta resistencia.

Componente	Dosificación (kg/m³)	
	HC	AR
Arena 0/4	995	860
Árido 4/10	401	440
Árido 10/20	499	490
Agua	148	168
CEM I 52.5 R	370	420
Aditivo superplastificante	3,7	3,15
Relación arena/grava	1,11	0,92
a/c	0,4	0,4

Tabla 1_ Dosificaciones de hormigón utilizadas

3 Comportamiento estructural

El hormigón reforzado con fibras funciona mediante la superposición de tres factores: hormigón en masa, fibras y la interacción entre ambos materiales (condicionado por la pérdida de adherencia). La superposición de cada uno de estos fenómenos se refleja en la creciente contribución de las fibras tras la rotura de la matriz de hormigón hasta una tensión residual máxima que es condicionada por la interacción entre los materiales. Dicha interacción suele inducir una pérdida de adherencia y una reducción de la resistencia del conjunto formado por hormigón y fibra. A partir de ese punto, se aprecia una tendencia de estabilización de la respuesta mecánica obtenida.

En la fase previa a la fisuración, el comportamiento a flexión de los hormigones reforzados con fibras se asimila al del hormigón sin fibras y se considera elástico y lineal. Tras una pérdida instantánea de rigidez debida a la fisuración, en el punto A se inicia la contribución de las fibras, lo que supone un incremento de la carga resistida para un determinado ancho de fisura respecto al hormigón sin fibras. La contribución de las fibras crece hasta el punto B, momento en el que las fibras alcanzan su máxima contribución. El punto B y la pendiente del tramo AB, está gobernada por el tipo y cuantía de fibra. A partir del punto B, comienza la

pérdida de adherencia y arrancamiento que se acentúa a partir del punto C.

Un mayor detalle del comportamiento a flexión de las dosificaciones estudiadas puede encontrarse en los resultados de las fases experimentales realizadas en el proyecto DURADOV (tabla 2). En estas fases de ensayos se obtienen los valores medios a los 28 días del límite de proporcionalidad (f_{tj}) y las resistencias residuales a flexotracción ($f_{R,j}$ [MPa]) especificadas en la norma EN 14651 (2005) para distintas aperturas de fisura $fr1$ (0,5 mm), $fr2$ (1,5 mm), $fr3$ (2,5 mm), $fr4$ (3,5 mm) para distintos tipos de fibras y dosificaciones de hormigón convencional (HC) y alta resistencia (AR).

Características mecánicas exigidas en dovelas HRF para túneles

En los proyectos de túneles con dovelas reforzadas con fibras se exigen unas ciertas características mecánicas:

- Resistencia a compresión en edades tempranas (desmoldeo, acopio y manipulación) habitualmente en torno a 12-15 MPa, y valores habituales a 28 días ≥ 40 MPa y a 90 días ≥ 50 MPa;
- Resistencia a tracción entre 4-5 MPa;
- Resistencia residual a flexotracción para distintas aperturas de fisura según distintos tipos de ensayo. Actualmente se suele exigir un mínimo de resistencia residual en el límite de proporcionalidad (f_{LOP}) y también en una apertura de fisura en torno a 2,5 mm- 3,5 mm según se realice el ensayo de flexotracción europeo o americano. Estas resistencias residuales mínimas suelen estar en un rango de 4-5 MPa para f_{LOP} y para aperturas de fisuras de 2,5 y 3,5 mm suelen estar alrededor de 3-4 MPa. Por supuesto estos valores son orientativos ya que estas resistencias mínimas provienen en todos los casos de un cálculo estructural en cada proyecto.

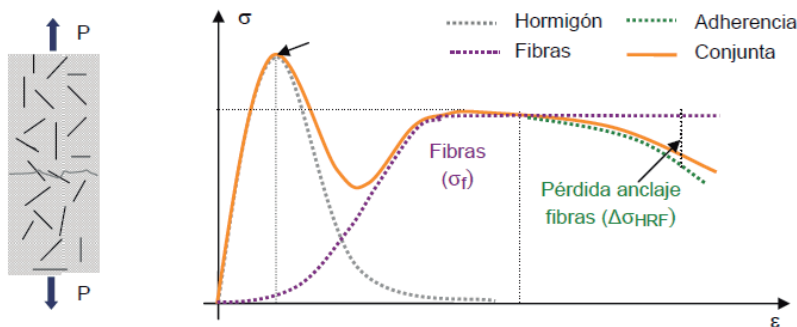


Fig. 1_ Comportamiento de hormigón reforzado con fibras

	AR_10_PP4	AR_10_PP5	AR_10_PP6	AR_10_PP7	AR_10_PP8	AR_19,6_B2
fr lop (MPa)	4,72	3,99	4,22	4,46	3,67	3,81
Desv. Est. (MPa)	0,83	0,02	0,1	0,12	0,19	0,32
CV (%)	17,67	0,58	2,42	2,8	5,15	8,45
fr1 (MPa)	2,89	2,23	2,63	1,68	2,19	-
Desv. Est. (MPa)	0,25	0,62	0,41	0,17	0,15	-
CV (%)	8,85	27,65	15,58	9,82	6,82	-
fr2 (MPa)	3,97	3,06	3,5	2,56	2,77	-
Desv. Est. (MPa)	0,34	0,9	0,51	0,25	0,17	-
CV (%)	8,51	29,36	14,58	9,94	6,19	-
fr3 (MPa)	4,45	3,45	3,86	3,24	2,9	-
Desv. Est. (MPa)	0,43	0,92	0,58	0,43	0,21	-
CV (%)	9,59	26,61	15,09	13,19	7,21	-
fr4 (MPa)	4,41	3,56	3,97	3,52	2,78	-
Desv. Est. (MPa)	0,49	0,82	0,65	0,5	0,24	-
CV (%)	11,19	23,16	16,51	14,22	8,51	-

Tabla 2_ Resistencia residual a flexotracción AR (3ª fase de ensayos- DURADOV
(Desv.Est.: Desviación estándar, CV (%): Coeficientes de Variación)

Campañas experimentales. Ensayos realizados.

Se han llevado a cabo 3 campañas experimentales con un total de 455 probetas ensayadas para los siguientes ensayos para conocer la capacidad resistente:

- Resistencia a compresión a 7 y a 28 días;

- Comportamiento post-fisuración del hormigón. Ensayo de resistencia residual a flexotracción (UNE-EN 14651:2007) y el ensayo Barcelona de doble punzonamiento;

- Módulo de elasticidad mediante ensayo de velocidad ultrasónica.

Y también para conocer las características de durabilidad:

- Densidad y porosidad accesible al agua (UNE 83980:2004);

- Absorción de agua por capilaridad (UNE 83982:2008).

En las fases experimentales se ensayaron los siguientes tipos de fibra y dosificaciones (tabla 3):

	Número de fibras ensayadas en un mismo material	Material	Dosificación (kg/m³)	Tipo de hormigón*
Fase I	3	Polioléfina	6,4	HC y AR
	1	Basalto	19,6	
	2	Vidrio	12,6-18,7	
Fase II	3	Polioléfina	8	HC y AR, esqueleto granular modificado
	3	Polioléfina	10	
	1	Vidrio reforzado con poliolefina	20	
Fase III	5	Polioléfina	10	AR
	1	Basalto	19,6	
	1	Carbono	9	
Fase IV	2	Polioléfina	10	AR
	2	Polioléfina de 2 tipos	5+5**	
	2		3+7**	

Tabla 3_ Tipos de fibras y dosificaciones utilizadas

* HC: hormigón convencional

AR: hormigón de alta resistencia

** 5+5: 5 kg/m³ de PP3 + 5 kg/m³ de PP4 (PP3, PP4 dos tipos distintos de fibras de poliolefina)

** 3+7: 3 kg/m³ de PP3 + 7 kg/m³ de PP4

Comportamiento post-fisuración

Para el comportamiento post-fisuración del hormigón con fibras no metálicas para dovelas se han realizado ensayos de resistencia residual a flexotracción (UNE EN 14651) y Barcelona (UNE 83515). En la primera fase se observó que las fibras derivadas de la poliolefina son las que tenían un mejor comportamiento a flexotracción con una resistencia residual a flexotracción en el rango de 1,26-2,55 MPa con apertura de fisura 2,5 mm (fr_3) y f_{LOP} de 3,71-5,14 MPa con una dosificación de 6,4 kg/m³ (0,7 % del volumen). Estos resultados de resistencia residual eran bajos teniendo en cuenta las exigencias existentes en los proyectos, por lo que se decidió modificar el esqueleto granular de la mezcla de hormigón, aumentar la dosificación y ensayar ya solo con fibras de poliolefina y de vidrio por los malos resultados con las de basalto.

En la segunda fase de ensayos las fibras de poliolefina (PP1-PP3) dieron los mejores resultados respecto a las de vidrio (FV2). En esta fase se aumentó la dosificación a 8 y 10 kg/m³ dando lugar a resistencias residuales de 2,40-3,81 MPa para fr_3 y 3,50-4,92 MPa para el f_{LOP} para la dosificación de 10 kg/m³. Las fibras de vidrio dieron resultados bajos en el fr_3 como se puede observar en el siguiente gráfico. El valor f_{LOP} viene influenciado principalmente por la matriz de hormigón y no por las fibras incorporadas.

La fibra PP3 tiene los mejores resultados en resistencia hasta alcanzar la apertura de fisura de 2,5 mm pero a partir de este momento sufre una pérdida de adherencia debido a la geometría y a la textura de dicha fibra, sobre todo por ser una fibra con gran esbeltez pero lisa.

En la tercera fase experimental queda confirmado que las macrofibras de poliolefina son aquellas que dan mayores resistencias en comparación con las fibras de basalto y de carbono. Se obtiene una resistencia residual a flexotracción fr_3 de 4,45 MPa con 10 kg/

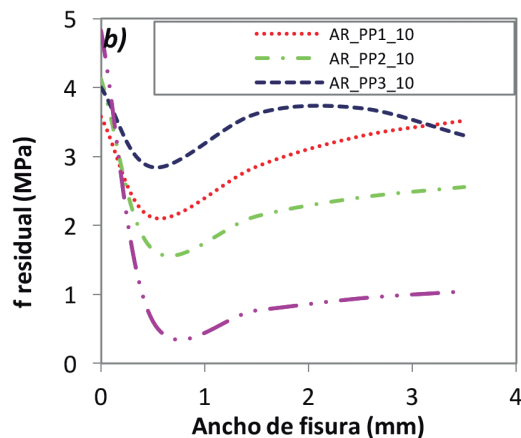


Fig. 2_ Resistencias residuales a flexotracción de hormigón de alta resistencia en Fase II

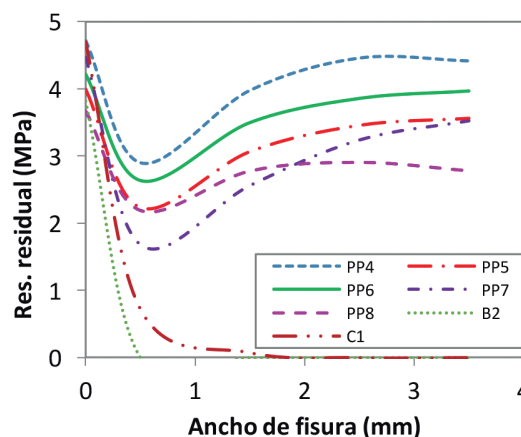


Fig. 3_ Resistencias residuales a flexotracción de hormigón de alta resistencia en Fase III

m³ con la fibra PP4, similar a lo que se había obtenido en la fase anterior con la fibra PP3 pero existe una mejora que es que su resistencia en mayor apertura de fisura se estabiliza e incluso aumenta para las fibras PP4 a PP7. De hecho, las fibras PP4 y PP6 con dosificación de 10 kg/m³ obtienen un fr_4 (CMOD: 3,5 mm) de 3,97-4,41 MPa.

En la Fase IV se obtienen excelentes resultados a flexotracción que se exponen a continuación para las distintas fibras y dosificaciones y los 9 ensayos hechos para la fibra PP4, con un máximo de f_{LOP} de 6,79 MPa y fr_3 de 7,54 MPa, un promedio de f_{LOP} de 6,41 MPa y fr_3 de 6,67 MPa que cumplen las exigencias a nivel estructural actuales holgadamente.

Los ensayos Barcelona confirmaron los resultados obtenidos con los ensayos a

flexotracción de que las fibras derivadas de la poliolefina tienen la mayor tenacidad y control de la fisuración.

Ecuaciones constitutivas

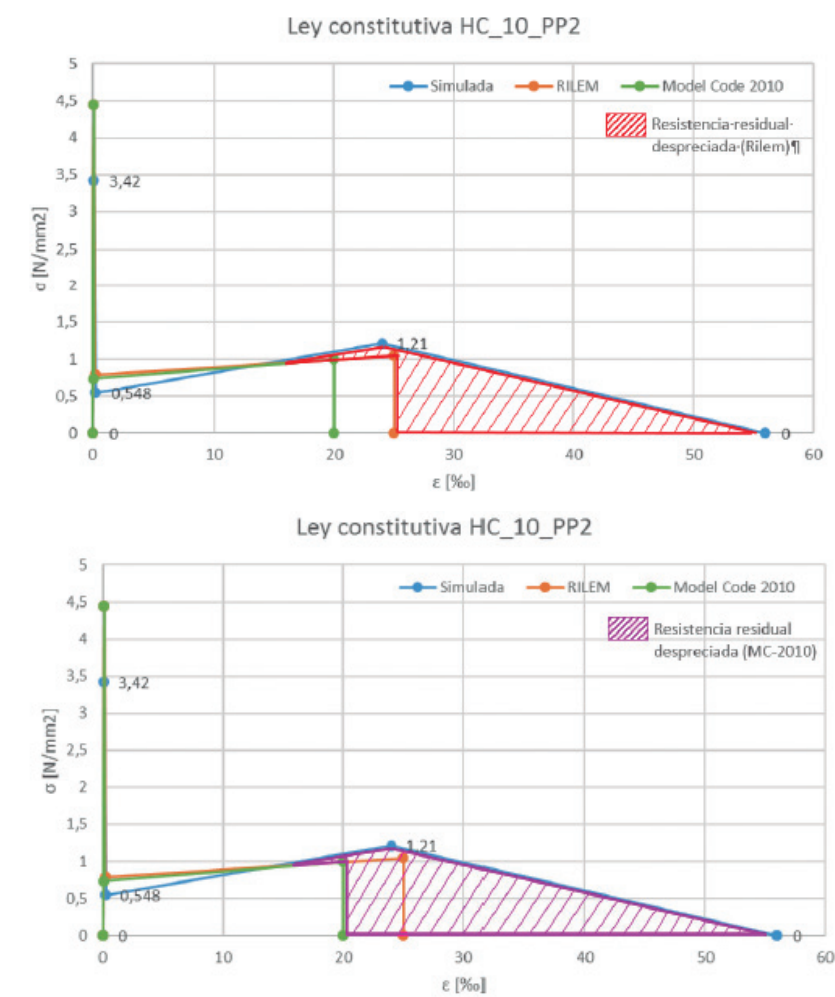
Se ha obtenido la ecuación constitutiva del hormigón reforzado con fibras no metálicas mediante análisis inverso y mediante las normativas (Model Code 2010 y RILEM) para compararlas. La conclusión fundamental es, entre otras, que el ajuste de las normativas respecto al análisis inverso no es muy bueno. En los primeros tramos el ajuste es aceptable, pero al ser las leyes constitutivas de las normativas tri-lineales, se desprecia la aportación extra de resistencia residual.

Adicionalmente, se realizó una comparación con el comportamiento de un hormigón con fibras metálicas y se llega a la conclusión de que las leyes cons-

Fase IV	Flop (MPa)	CV %	$f_{R,1}$ (MPa)	CV %	$f_{R,2}$ (MPa)	CV %	$f_{R,3}$ (MPa)	CV %	$f_{R,4}$ (MPa)	CV %
AR_10_PP6	4,78	7,4	2,86	3,44	3,93	4,34	4,46	4,62	4,65	3,12
AR_10_PP4	4,74	4,93	4,2	10,83	6,11	14,26	6,99	14	7,1	13,89
ARm_5+5_PP3,4	5,08	2,21	3,98	5,36	5,42	6,58	6,01	6,47	6,17	7,9
ARm_3+7_PP3,4	4,51	8,12	3,15	28,36	4,61	31,65	5,17	27,76	5,46	27,21

9 ensayos adicionales con PP4	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Promedio (MPa)	Desv. Est. (MPa)	C.V. (%)
f_{LOP}	6,79	7,13	6,22	7,51	6,51	5,34	5,68	6,51	5,96	6,41	0,69	10,77
f_{R1}	4,23	4,7	4,37	4,76	4,3	4,75	3,76	4,28	4,69	4,43	0,33	7,52
f_{R2}	5,89	6,48	5,72	6,5	5,75	6,92	4,95	6,08	6,77	6,12	0,62	10,12
f_{R3}	6,59	7,08	6,07	7,44	6,4	7,54	5,58	6,64	6,71	6,67	0,63	9,39
f_{R4}	6,77	7,01	6,09	7,26	6,31	7,7	5,54	6,12	6,54	6,59	0,67	10,1

Tabla 4_ Resistencias residuales a flexotracción de hormigón de AR en Fase VI



Figs. 4 y 5_ Leyes constitutivas donde se indica la parte de resistencia residual que desprecian las normativas, en rojo (RILEM) y en morado (Model Code-2010)

titutivas de las normativas se adaptan mejor que con fibras no metálicas. El valor post-pico de la tensión residual es menor que lo considerado en las normativas y existe una caída drástica desde la tensión de fisuración. El valor pico de la tensión residual para fibras metálicas se encuentra entre 8-15% de deformación de las normativas y la aportación de resistencia residual que se desprecia es menor.

Con el fin de ajustar mejor la ecuación constitutiva al hormigón reforzado con fibras no metálicas se propone una ley constitutiva cuatri-lineal transformando la deformación última de las Normativas vigentes en residual, añadiendo una deformación última de 40%, de esta manera se sigue estando del lado de la seguridad pero con una mayor aproximación a lo real.

4 Durabilidad

Para evaluar la durabilidad de los diferentes tipos de fibras ensayados durante el proyecto se ha realizado una campaña experimental en la que se ha sometido a la fibra a diferentes ambientes agresivos y exposiciones. Todos los ensayos se han realizado a través del hilo madre de la fibra, no de la fibra propiamente dicha, para poder caracterizar mejor las propie-



Fig. 6_ Esquema de la campaña experimental

dades básicas y las características físico-químicas. Se han realizado ensayos sobre 8 fibras de poliolefina de diferentes características y una de basalto.

Se ha sometido a las fibras a siete disoluciones con diferentes iones agresivos, y con diferentes periodos de exposición:

El procedimiento seguido consiste en preparar las disoluciones, sumergir las fibras en cada una de ellas y mantenerlas en una cámara climática a la temperatura de ensayo. La exposición varía de 1 a 60 días. Se secan y se guardan en film transparente hasta el momento de ser ensayadas.

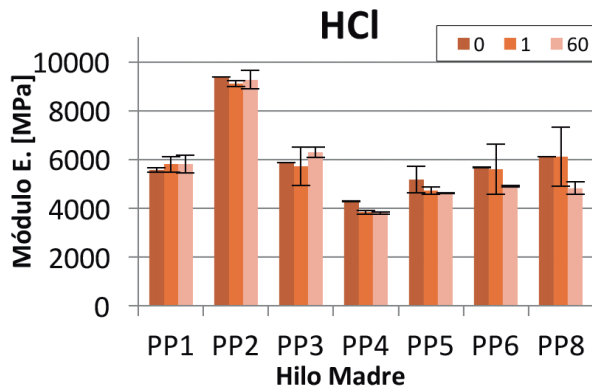
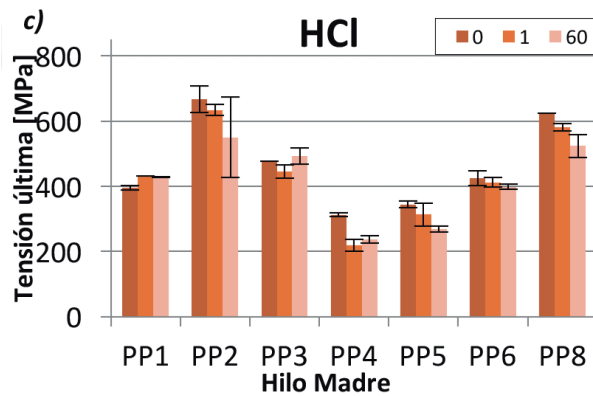
Los ensayos seleccionados para evaluar el comportamiento frente a los agentes agresivos son:

- Microscopía electrónica de barrido
- Espectroscopía Raman
- Características superficiales
- Resistencia a tracción y módulo elástico

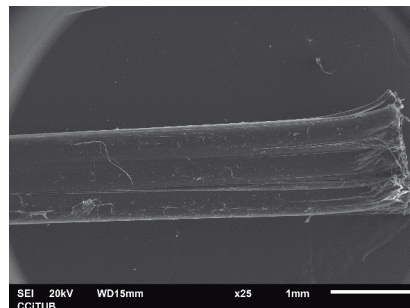
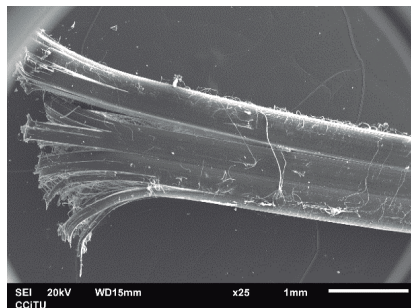
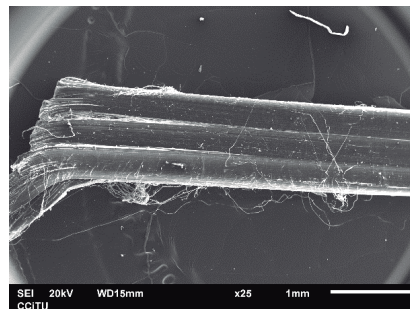
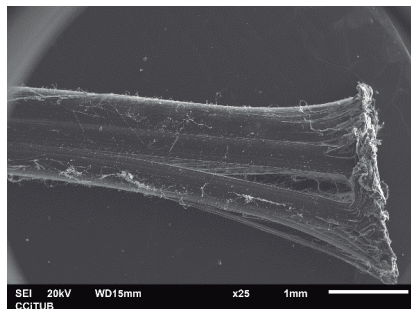
Se exponen a continuación, como ejemplo, algunos resultados obtenidos en el proceso de ensayo.

Los resultados obtenidos tras el periodo de inmersión y ensayo indican que no se aprecia degradación importante en ninguna de las muestras, manteniéndose las propiedades mecánicas y características superficiales muy similares a las iniciales. Las variaciones en la resistencia a tracción y módulo están de media en un 10-15 % de reducción. Los ensayos de microscopía de barrido y espectroscopía Raman no indican una alteración en las características de las fibras. Por lo tanto, los ensayos realizados avalan la alta durabilidad de las fibras de poliolefina cuando se las somete a diferentes agentes agresivos.

Tipo de ataque químico	Medio	Concentración	Nomenclatura	Temperatura	Duración
Sales	Cloruros	3 %	NaCl	20 °C	1-60 d
	Magnesio	5 %	MgSO ₄	20 °C	
	Sulfatos	5 %	NaSO ₄	20 °C	
Ácidos	Clorhídrico	10 %	HCl	20 °C	
	Sulfúrico	5 %	H ₂ SO ₄	20 °C	
	Acético	5 %	CH ₃ COOH	20 °C	
Básico	Álcalis	1M	NaOH	40 °C	



Figs. 7 y 8_ Resistencia a tracción y módulo de elasticidad tras exposición a HCl



Figs. 9_ Micrografías electrónicas SEM de la fibra PP8 sin atacar,
Ácido: HCl 10 %, H_2SO_4 Básico: NaOH

5 Comportamiento a temperaturas extremas

Características de comportamiento al fuego exigidas en proyectos

El objetivo de la resistencia al fuego de las dovelas de HRF es dotarlas de un comportamiento estructural tal que tras un fuego de una determinada intensidad y con una determinada duración, el anillo de dovelas tenga la suficiente resistencia residual para que continúe ejerciendo su función de soportar las cargas del terreno y siga siendo estable y seguro para vehículos y personas que transiten a través de él.

En la actualidad existen numerosas normativas, recomendaciones y/o guías para el diseño de estructuras de hormigón frente al fuego que exigen a éstas resistir una determinada curva de fuego para asimilar un incendio tipo y su efecto sobre el anillo de dovelas en este caso. A partir de la aplicación de una de estas curvas de fuego se analiza la respuesta térmica de la sección y el fenómeno del *spalling*.

Los requisitos para el diseño de la resistencia al fuego de las dovelas en los proyectos son:

- Cumplir con los requisitos de intervención y evacuación;
- Garantizar la resistencia residual suficiente tras el fuego;
- Cumplir la curva de fuego establecida y que exista integridad para permitir el rescate y la evacuación de las personas y la intervención de los equipos de rescate sin riesgo de colapso estructural;
- El criterio de fallo de las muestras ensayadas en una curva de fuego es que no se produzca un *spalling* significativo de las superficies expuestas al fuego. En dovelas reforzadas con fibras metálicas se le añade una pequeña dosificación de fibras de polipropileno mientras

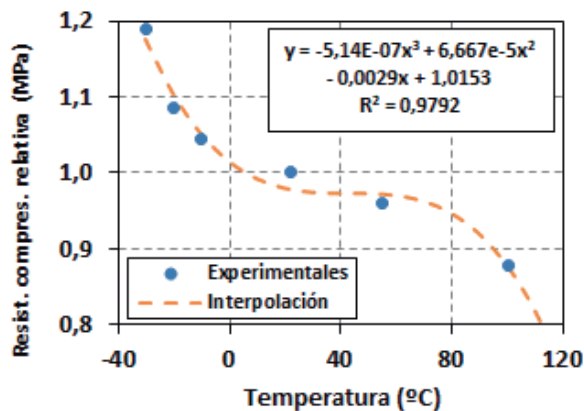


Fig. 10_ Resultados de resistencia a compresión en términos de temperatura

que con fibras no metálicas no sería necesario.

Ensayos a temperaturas extremas

Para esta campaña se utilizó la mezcla de hormigón con 10 kg/m³ de fibras de poliolefina que mejores resultados dio en los ensayos de comportamiento mecánico.

Los ensayos realizados para caracterizar al hormigón son el de resistencia a compresión, el de flexotracción y el ensayo Barcelona, todo ello a distintas temperaturas que son: -30 °C, -20 °C, -10 °C, 22 °C, 55 °C y 100 °C.

Se observa que la resistencia a compresión disminuye a medida que aumenta la temperatura en un rango de 69,80 a 51,51 MPa.

Los resultados de los ensayos a flexotracción arrojan los mismos resultados, es decir, que con la disminución de temperatura aumenta la resistencia residual y viceversa.

Los resultados en los Ensayos Barcelona confirman lo ya expuesto. Además, se concluye que las fibras presentan un comportamiento estructural más homogéneo a temperatura ambiental de 22 °C, ya que sus coeficientes de variación son menores que a temperaturas por debajo de 0 °C.

Ensayos a escala real

Se realiza una campaña de ensayos con dovelas a escala real para analizar el comportamiento de dovelas de hormigón reforzado con fibras sometido a

situaciones accidentales de incendio y carga exterior. Se ensayaron dovelas reales con la geometría de una obra hidráulica actualmente en construcción por DRAGADOS en Ottawa (Canadá). Estas dovelas tienen unas dimensiones de 3 m de diámetro y 3,40 m de diámetro exterior.

Para el ensayo al fuego se colocan las dovelas sobre un horno en cuyo interior se simula un incendio que alcanza los 1.100 °C utilizando la curva de hidrocarburos del Eurocódigo-1. Además, se ensayaron estas mismas dovelas a flexión. Se realizaron estos ensayos en dovelas de HRF metálicas (40 kg/m³) como los que se fabrican para la obra y en dovelas de HRF de poliolefina (10 kg/m³) con el fin de comparar ambos tipos de dovela.

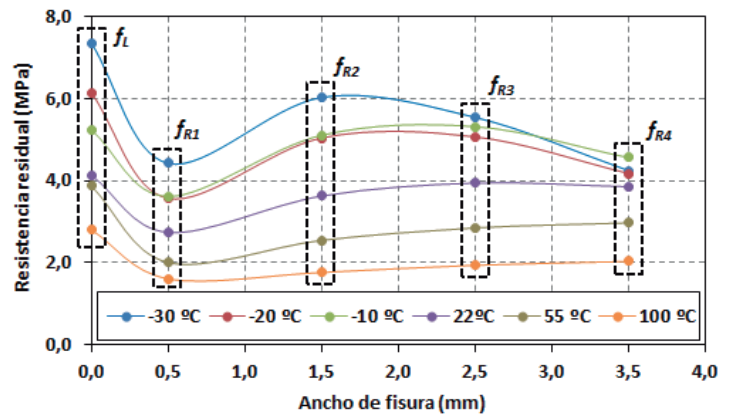


Fig. 11_ Resultados de resistencia a flexotracción en términos de temperatura

Se ensayaron 4 dovelas, dos con fibras metálicas y dos con fibras de poliolefina. Una de cada se ensayó al fuego y después se sometió al ensayo a flexión y las otras dos solo se ensayaron a flexión para conocer el cambio en sus propiedades provocado por el fuego.

Para los ensayos al fuego se colocaron 12 termopares en la dovela para medir la distribución de temperaturas en la misma. Se concluye que el comportamiento térmico de las dovelas de hormigón en términos de evolución de la temperatura es independiente del tipo de fibra.

En el ensayo al fuego se observa en la inspección visual y en la medición del *spalling* que las dovelas con fibras me-



Foto 1_ Dovelas antes de ser sometidas a los ensayos al fuego



Fotos 2 y 3_ Colocación de la dovela en el horno

Fibras metálicas (SFRC)			Fibras poliolefina (PFRC)		
Máx. (mm)	Min. (mm)	Promedio (mm)	Máx. (mm)	Min. (mm)	Promedio (mm)
104	5	32	43	6	19

Fig. 12_ Desprendimiento de los hormigones tras ensayar las dovelas al fuego

tálicas presentan desprendimientos de hormigón de mayor profundidad media pero menos extendidos. Esta mayor profundidad del *spalling* se traduciría en una reducción más severa del canto de la sección por lo que el número de fibras que cosen una sección se vería reducido. Esto se podría explicar debido a que la dilatación del acero provoca unas expansiones volumétricas de las fibras que el hormigón no es capaz de compensar, por lo que aparecen tensiones de tracción en él que facilitan el desprendimiento. Al contrario, las fibras de poliolefina funden a una temperatura de 200 °C, por lo que las tensiones que pueden generar en el hormigón en caso de incendio son muy reducidas.

En los ensayos a flexión se observa que la dovela de fibras metálicas tiene una pérdida en carga máxima obtenida de un 51 % (de 173,8 kN a 85,08 kN). Esto es debido tanto al deterioro del hormigón como a la reducción de espesor debido al *spalling*. En comparación, las dovelas reforzadas con fibra

de poliolefina tienen una pérdida en carga máxima de un 73 % (de 134,7 kN a 35,3 kN).

6 Conclusiones

Las dovelas de hormigón reforzado solo con fibras no metálicas son en el presente una solución muy ventajosa en términos de durabilidad y sostenibilidad para dar solución a la larga vida útil exigida en mucho proyectos que se diseñan en ambientes de cierta agresividad. En este artículo se demuestra que este material cumple con los requisitos estructurales que se exigen a nivel mundial por lo que a día de hoy pueden servir para el diseño de dovelas para túneles y otras aplicaciones. El estudio sobre el comportamiento al fuego que se ha realizado ofrece resultados buenos en comparación con las fibras metálicas y se espera ampliar el conocimiento en este campo con más ensayos en un futuro próximo. 